

## 표준학교건물의 3차원 비탄성거동에 대한 이력모델의 영향

윤태호\*

<sup>1</sup>창원대학교 건축학부

### 3-Dimensional Inelastic Behavior of Standard School Building with Various Hysteresis Models

Yoon Tae Ho<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Architecture, Changwon National University

**요약** 본 논문은 내진성능평가를 위해 사용되는 비탄성해석의 신뢰도와 정확도에 있어 결정적인 영향을 미치는 다양한 이력모델의 특성과 구조물의 내진거동에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 연구대상은 표준학교건물로서 우리나라 규준에 맞는 인공지진 가속도 3가지를 사용하여 4가지의 이력모델을 적용하여 3차원 시간이력해석을 수행하였다. 비탄성해석을 통해 층전단력, 층간변위비, 층변위를 비교하고 힌지의 발생 상태를 파악하고 이력모델이 건물의 비탄성거동에 미치는 영향을 분석하였다. 연구 결과, 층전단력은 이력모델에 따라 최대 27%의 차이를 보이고, 층간변위비는 최대 30%의 차이가 나타났다. 장단변방향 모두에서 층전단력과 층간변위비는 최대값이 수정다케다모델에서 나타나 안전을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다. 층전단력의 최소값은 장단변방향 모두에서 클러프모델에서, 층간변위비는 장변방향은 다케다모델, 단변방향은 클러프모델에서 나타났고 이 경우 안전율이 낮아질 것으로 사료된다.

**Abstract** The three dimensional inelastic response characteristics of the standard school buildings depending on hysteresis models are reviewed. Three artificial earthquake records in accordance with KBC(Korea Building Code) are used and the inelastic response characteristics such as story shear force, story drift ratio, story displacement, hinge distribution state are reviewed with four hysteresis models. As results, story shear force is increased by maximum 27% and story drift ratio is increased by maximum 30% according to hysteresis models. Modified Takeda Model shows maximum story shear and story drift ratio in longitudinal and short direction, expecting higher safety. Story shear shows minimum value with Clough Model in both directions and story drift ratio shows minimum with Takeda model in longitudinal and with Clough model in short direction, so these models are expected to decrease the safety ratio.

**Key Words** : 3-Dimensional, Hysteresis Model, Inelastic Behavior, Time History Analysis, Standard School Building

#### 1. 서론

최근 기상청의 자료에 따르면 우리나라의 지진 빈도는 1977년 이후 꾸준히 증가하고 있으며, 이에 따라 재난시 피난시설로 사용될 학교건물에 대한 내진성능의 확보가 매우 중요하다. 학교건물은 대다수의 건물이 내진규정을 적용받지 않았던 1988년 이전에 지어진 건물로

서, 초등학교 대부분과 중학교의 81%, 고등학교의 76%가 1988년 이전에 지어진 건물로써 내진 설계가 고려되지 않았다[1]. 그리고 1988년 내진규정이 생기고 난 이후에도 학교건물은 6층 이상, 연면적 10,000㎡이상에 대부분 속하지 않기 때문에 2005년 내진규정이 3층 이상, 연면적 1,000㎡이상으로 강화되기 전까지 초등학교 5,646곳, 중학교 2,935곳, 그리고 고등학교 2,095곳의 대

본 논문은 2013~2015년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구되었음

\*Corresponding Author : Tae-Ho Yoon(Changwon National Univ.)

Tel: +82-55-213-3809 email: thyoony@changwon.ac.kr

Received March 20, 2015

Revised (1st April 3, 2015, 2nd April 7, 2015)

Accepted April 9, 2015

Published April 30, 2015

부분 학교건물이 내진규정 적용을 받지 않았다. 내진 규정을 적용 받았더라도 15층 이상 아파트 및 오피스텔보다도 낮은 내진등급[2]이 적용되어 지진발생시 피난시설로 제 역할을 할 수 있을지 내진성능을 확인하는 것이 필요하다.

내진성능의 평가는 구조물의 비탄성거동을 고려한 정적해석이나 동적해석이 사용되며, 동적해석에서 다양한 이력모델들이 사용되고 있다. 그러나, 이력모델에 대한 비교·분석 자료가 미흡해서 이력모델 선택에 따른 비탄성 거동응답에 대한 상이한 결과 평가에 어려움이 있다.

본 연구에서는 표준학교건물에 대한 기존의 2차원 해석을 통한 연구[3]를 확장시켜 3차원해석을 수행하여 이력모델들에 따른 비탄성거동을 비선형시간이력해석으로 비교·분석한다. 연구방법으로는 우리나라 규준에 맞는 인공지진 가속도 3가지를 건물에 가한 후, 이력모델을 달리해 3차원 시간이력해석을 하여 최대응답을 구하였다. 이를 바탕으로 장·단변방향으로 나누어 층진단력, 층간변위비, 층변위를 비교하고 힌지의 발생 상태를 분석하여 구조물의 지진거동에 미치는 이력모델별 특성을 파악하고 내진설계시 고려해야 할 점을 연구 하였다.

## 2. 이력모델

본 연구에서 사용한 이력모델은 콘크리트구조물의 내진해석에 일반적으로 사용되는 다음 4가지의 모델을 사용하였다. (Figure 1)

- (1) 강성저감삼선형모델(Stiffness Degrading Trilinear Type)
- (2) 클러프모델Clough Type)
- (3) 다케다모델(Takeda Type)
- (4) 수정다케다모델(Modified Takeda Type)

비선형 이력모델은 지진하중과 같은 반복하중을 받는 경우 단면 혹은 재료의 특성으로 도출되는 항복강도, 강성 및 강도의 저감정도를 모사하는 규칙에 따라 정의할 수 있다. 하중과 변형에 대한 이동경로를 지정하기 위하여 재하/loading), 제하(unloading), 재재하(reloading)의 상태를 고려한다. 이들은 통상적으로 특정한 실험결과에 근거하고 있다. 따라서 이들을 실험과 다른 구조물에 적용할 때는 Fig. 2와 같은 이력거동의 특성[4]과 제한사항

을 인식하여야 한다.

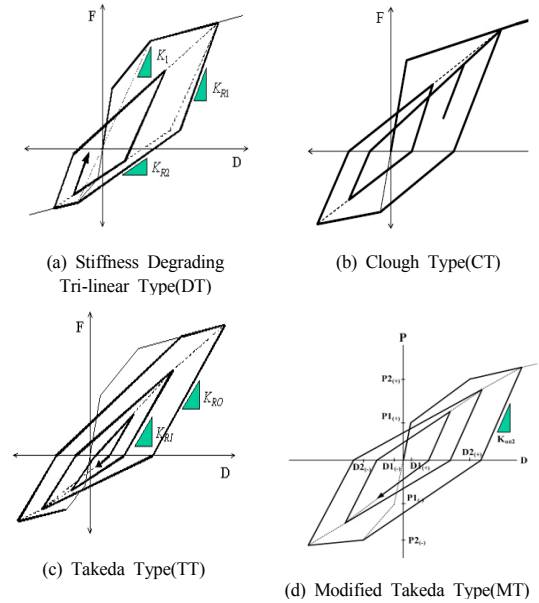


Fig. 1. Hysteresis models

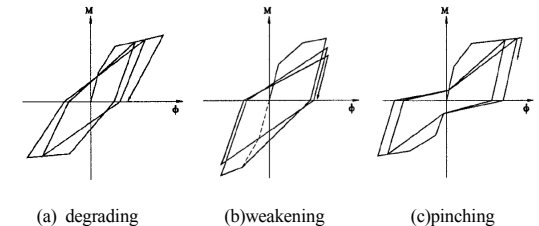


Fig. 2. Characteristics of hysteresis models

## 3. 내진해석

### 3.1 해석 방법

해석 대상 건물은 건설부에서 1980년에 공고한 표준 학교설계도 (건설부 공고 제130호, 1980년 10월 28일)에 의하여 건설된 학교건물이다.

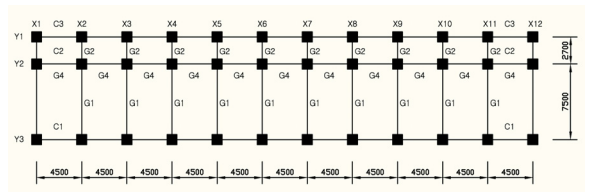


Fig. 3. Structural plan(unit:mm)

구조형식은 라멘RC구조이며, 층고는 3.3m인 편복도형 4층 교사건물로서 평면도는 Fig. 3과 같고, 사용된 기둥과 보의 단면리스트는 각각 Table 1, Table 2와 같다[5].

Table 1. Column list

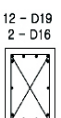
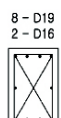
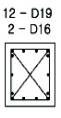

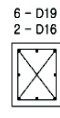


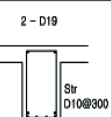
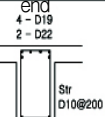
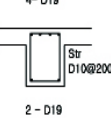
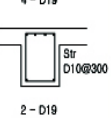
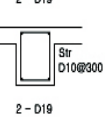
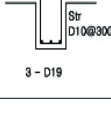
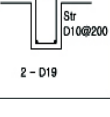
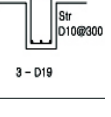
	1F	2F	3F	4F
C <sub>1</sub> 350 X 500	12 - D19 2 - D16  HOOP: D10@300 DIAHOOP: D10@300	8 - D19 2 - D16  HOOP: D10@300 DIAHOOP: D10@300	same as left	same as left
C <sub>2</sub> 350 X 400	12 - D19 2 - D16  HOOP: D10@300 DIAHOOP: D10@300	8 - D19 2 - D16  HOOP: D10@300 DIAHOOP: D10@300	6 - D19 2 - D16  HOOP: D10@300 DIAHOOP: D10@300	same as left
C <sub>3</sub> 350 X 350	8 - D16  HOOP: D10@300 DIAHOOP: D10@300	same as left	same as left	same as left

Table 2. Beam list

	Ext.	Center	Int.
1-3G1 350 X 600	end 4 - D19 2 - D22  Str D10@200 2 - D19	2 - D19  Str D10@300 2 - D22 4 - D19	end 4 - D19 2 - D22  Str D10@200 2 - D19
1-3G2 350 X 450	4 - D19  Str D10@200 2 - D19	4 - D19  Str D10@300 2 - D19	2 - D19  Str D10@300 2 - D19
1-3G4 250 X 450	2 - D19  Str D10@300 3 - D19	5 - D19  Str D10@200 2 - D19	2 - D19  Str D10@300 3 - D19

중력하중[5]은 일반적인 학교의 하중기준을 적용하였고, 콘크리트 설계기준강도는 18MPa, 철근의 항복강도는 240MPa을 적용하였으며, 지진하중은 건축구조설계

기준[2]을 적용하였으며, 조적벽과 콘크리트의 노후화는 무시하였다.

### 3.2 입력지진

지진하중은 부지에서 계측된 시간이력을 사용하는 것이 원칙이지만 필요시에는 다음과 같은 3가지 경우를 이용함으로써 구조물에 대한 비선형 시간이력해석을 수행할 수 있다.

- (1) 고려되는 지반의 특성과 유사한 3개 가속도 시간이력을 이용하고 최대응답으로 설계
- (2) 고려되는 지반의 특성과 유사한 7개 가속도 시간이력을 이용하고 평균응답으로 설계
- (3) 성능목표에 해당하는 응답스펙트럼과 잘 부합하는 인공 가속도 시간이력 이용

본 연구에서는 위의 방법 중에 방법(3)을 선택하여 건설교통부 고시 건축구조설계기준 [2]에 제시된 Table 3의 내용을 바탕으로 하여 Figure 4의 설계응답스펙트럼과 가장 부합되도록 생성하였다. 생성된 지진파를 다음 식으로 환산하여 현행기준에 맞는 지진파를 생성하였다.

$$S_{DS} = 2.5C_a \quad (1)$$

$$SD_1 = C_v \quad (2)$$

Table 3. Earthquake load condition

Area coeff. (A)	0.22
Site coeff.	1.0
Site type	S <sub>D</sub>
SDs (short period design spectrum acceleration)	3.6MA = 0.5267
SD1 (design spectrum acceleration at T=1sec)	2.3MA = 0.3365

※M=1.33(spectral acceleration equals 2/3 acceleration of earthquake with return period 2,400 years)

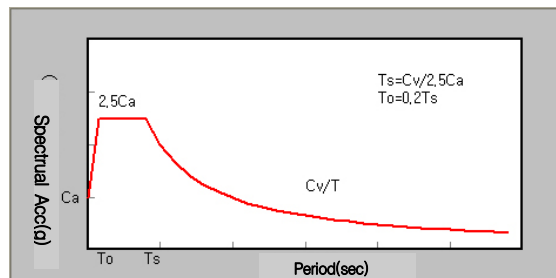


Fig. 4. Response spectrum of artificial earthquakes

인공지진가속도를 생성하는데 중요한 변수인 강진지

속시간과 관련하여 Fig. 5와 같이 TRISE와 TLVL의 시간을 (Trise-2, Tlvl-20), (Trise-4, Tlvl-18), (Trise-6, Tlvl-16) 3가지 Type으로 조절하여 Fig. 6과 같은 우리나라 기준에 맞는 인공지진가속도 3가지를 생성하였다.[6]

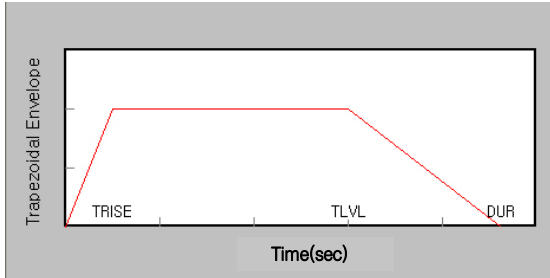
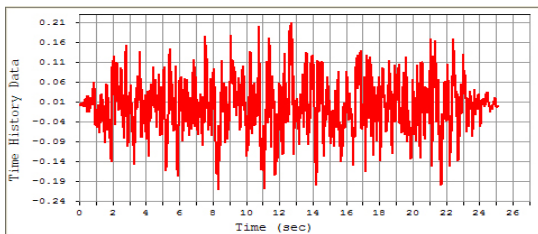
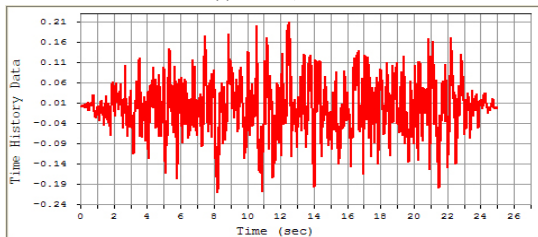


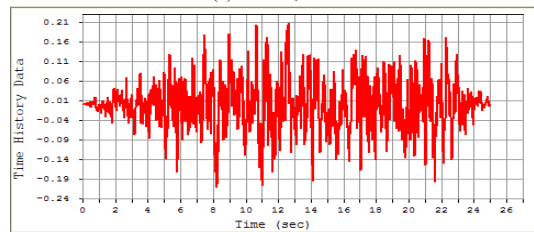
Fig. 5. Duration of artificial earthquakes



(a) Trise-2, Tlvl-20



(b) Trise-4, Tlvl-18



(c) Trise-6, Tlvl-16

Fig. 6. Time history of artificial earthquakes

## 4. 해석결과 비교

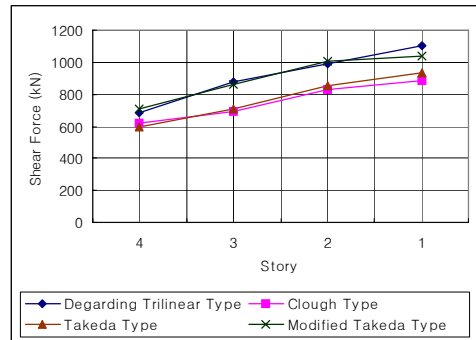
다양한 지진하중에 대하여 표준학교건물의 지진응답

을 3차원해석하고 그 최대응답을 상호비교함으로써 이력모델의 특성을 분석하였다.

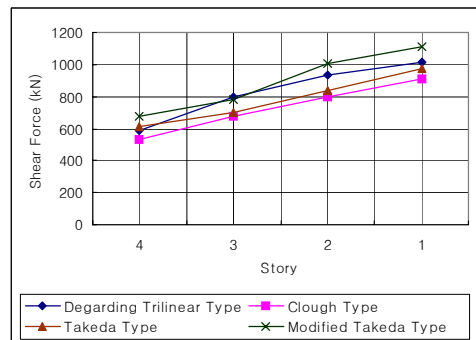
### 4.1 층응답의 비교

#### 4.1.1 층전단력

장변방향에서는 전 층에서 수정다케다모델 선택 시 가장 큰 전단력을 나타냈고, 1F,3F,4F에서 클러프모델 선택 시 가장 낮은 전단력을 나타냈다. 그 비율이 최고 20% 차이가 났다. 단변방향에서는 전 층에서 수정다케다모델 선택 시 가장 큰 전단력을 나타냈고, 2F,3F,4F에서 클러프모델 선택 시 가장 낮은 전단력을 나타냈다. 그 비율이 최고 27% 차이가 났다.



(a) longitudinal direction



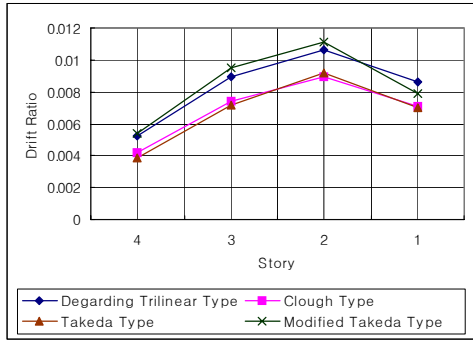
(b) short direction

Fig. 7. Story shear force

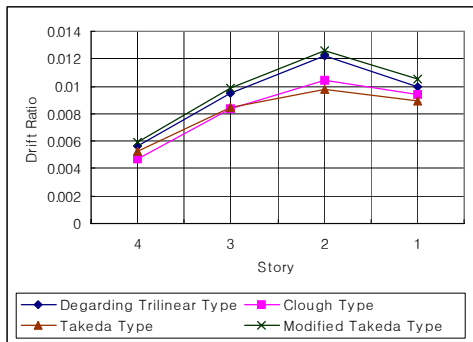
#### 4.1.2 층간변위비

장변방향에서는 전 층에서 수정다케다모델선택 시 가장 큰 층간변위비를 나타냈고, 1F,3F,4F에서 다케다모델 선택 시 가장 단낮은 전력이 나타났다. 그 비율이 30% 차이가 났다. 단변방향에서는 전 층에서 수정다케다모델 선택 시 가장 큰 층간변위비를 나타냈고, 2F,3F,4F에서

클러프모델 선택 시 가장 낮은 층간변위비를 차이가 낮다. 그 비율이 최고 24% 차이가 낮다.



(a) longitudinal direction

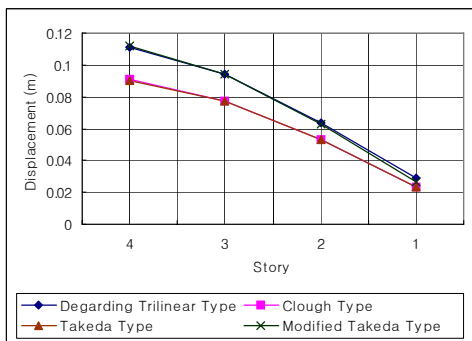


(b) short direction

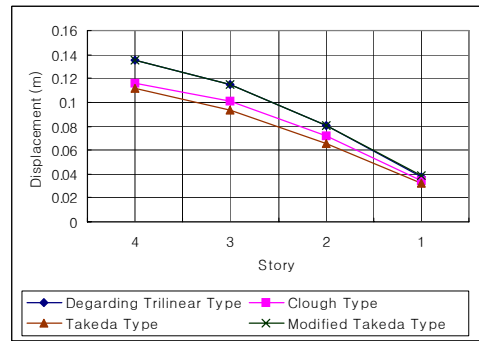
Fig. 8. Story drift ratio

#### 4.1.3 층변위

장변방향에서는 전 층에서 수정다케다모델선택 시 가장 큰 층변위를 나타냈고, 전 층에서 다케다모델, 선택 시 가장 낮은 층변위를 나타냈다. 그 비율이 최고 26% 차이가 낮다.



(a) longitudinal direction

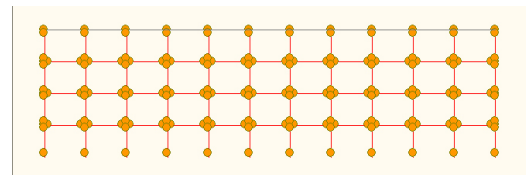


(b) short direction

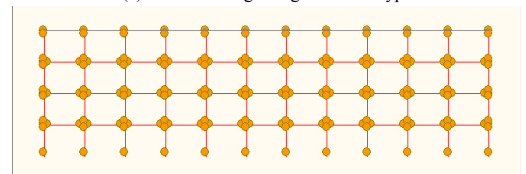
Fig. 9. Story displacement

#### 4.2 소성힌지발생의 비교

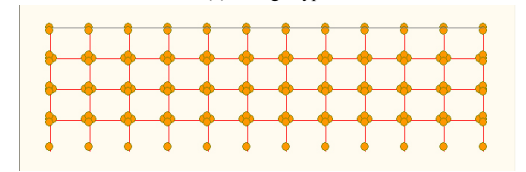
소성힌지발생분포는 클러프모델 선택 시 기둥부분의 힌지 발생이 다른 세 이력모델보다 더 많이, 더 빨리 발생하는 것으로 평가되었다.



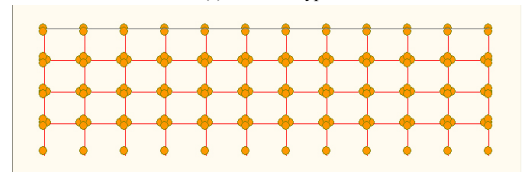
(a) Stiffness Degarding Trilinear type



(b) Clough type



(c) Takeda Type



(d) Modified Takeda Type

Fig. 10. Plastic hinge distribution

Table 4. Analysis results

		Value	1F	2F	3F	4F	
3D	longitudinal	Story Shear Force	max	MT	MT	MT	MT
			min	CT	TT	CT	CT
		Story Drift Ratio	max	MT	MT	MT	MT
	min		TT	CT	TT	TT	
	short	Story Shear Force	max	MT	MT	MT	MT
			min	TT	CT	CT	CT
Story Drift Ratio		max	MT	MT	MT	MT	
	min	TT	CT	CT	CT		
	Story Displacement	max	MT	MT	MT	MT	
		min	TT	TT	TT	TT	

※ DT: Degarding Trilinear Type      TT: Takeda Type  
 CT: Clough Type                      MT: Modified Takeda Type

### 5. 결론

본 연구는 이력모델선택에 따른 기존학교건물의 비탄성응답특성에 관한 연구로써 우리나라 규준에 맞는 인공지진 가속도 3가지를 건물에 가한 후, 이력모델을 달리해 3차원 시간이력해석을 하여 최대응답을 구하였다. 이를 바탕으로 장·단변방향으로 나누어 층전단력, 층간변위비, 층변위를 비교하고 힌지의 발생 상태를 분석해 이력모델선택에 따른 기존학교건물의 비탄성거동을 연구하였다. 그 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 층전단력의 경우 장변방향에서는 전 층에서 수정다케다모델 선택 시 가장 큰 전단력을 나타냈고, 1F, 3F, 4F에서 클러프모델 선택 시 가장 낮은 전단력이 나타났다. 그 비율이 최고 20% 차이가 났다. 단변방향에서는 전 층에서 수정다케다모델선택 시 가장 큰 전단력을 나타냈고, 2F, 3F, 4F에서 클러프모델 선택 시 가장 낮은 전단력을 나타냈다. 그 비율이 최고 27% 차이가 났다.

둘째, 층간변위비의 경우 장변방향에서는 전 층에서 수정다케다모델선택 시 가장 큰 층간변위비를 나타냈고, 1F, 3F, 4F에서 다케다모델 선택 시 가장 낮은 전력이 나타났다. 그 비율이 30% 차이가 났다. 단변방향에서는 전 층에서 수정다케다모델선택 시 가장 큰 층간변위비를 나타냈고, 2F, 3F, 4F에서 클러프모델 선택 시 가장 낮은 층간변위비 차이가 났으며, 그 차이는 최고 24%로 나타났다.

셋째, 층변위의 경우 장변방향에서는 전 층에서 수정다케다모델선택 시 가장 큰 층변위를 나타냈고, 전 층에서

다케다모델, 선택 시 가장 낮은 층변위를 나타냈다. 그 비율이 최고 26% 차이가 났다.

단변방향에서는 전 층에서 수정다케다모델 선택 시 가장 큰 층변위를 나타냈고, 전 층에서 다케다모델 선택 시 가장 작은 층변위를 나타냈다. 그 비율이 최고 27% 차이가 났다.

넷째, 소성힌지발생분포는 클러프모델 선택 시 기둥부분의 힌지 발생이 다른 세 이력모델보다 더 많이, 더 빨리 발생하였으며, 최종소성힌지 발생분포는 이력모델과 관계없이 유사하게 발생하는 것으로 평가되었다.

다섯째, 클러프모델과 다케다모델은 수렴성이 낮아 시간간격의 크기와 비선형해석 변수인 시간증분과 최대 반복횟수, 수렴기준을 조정해 수렴을 하도록 하였다.

여섯째, 연구 결과, 장·단변방향 모두에서 층전단력과 층간변위비는 최대값이 수정다케다모델에서 나타나 안전을 향상을 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 층전단력의 최소값은 장·단변방향 모두에서 클러프모델에서, 층간변위비는 장·단변방향은 다케다모델, 단변방향은 클러프모델에서 나타났고 이 경우 안전율이 낮아질 것으로 사료된다.

본 연구는 이력모델 선택에 따른 비탄성응답의 차이에 대한 초기연구로서 향후 중층 및 고층건물에 대하여 연구가 필요하다고 사료된다. 또한, 앞으로 이력모델의 선택에 따른 기존학교건물의 내진성능 평가까지 이루어져야 할 것으로 사료된다.

### References

- [1] Sungkuk Kang, et al., 2005 Educational Statistics, KDI, 2005.12
- [2] Architectural Institute of Korea, Korean Building Code-Structure, 2009
- [3] J. H. Je, J. S. Kim, T. H. Yoon, "Inelastic Behavior of Standard School Buildings according to Hysteresis Models," Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 10, No. 4, pp. 838~845, 2009.4  
 DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.9.4294>
- [4] K. K. Jang, "Hysteresis Models of Reinforced Concrete Structures," Computational Structural Engineering Institute of Korea, v.5, no.4, 1992, pp.13-23
- [5] J. S. Kim, T. H. Yoon, "Inelastic Seismic Behavior of Low-story Standard School Buildings according to Characteristics of Earthquake Loads and Hysteresis

Models,” Korea Academia- Industrial Cooperation Society, Vol.13, No.9, pp.4294~4301, 2012.9

DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.9.4294>

[6] O. S. Kwon, Eqmaker - Artificial Earthquake maker, Korea Martial Institute

윤 태 호(Tae-Ho Yoon)

[정회원]



- 1989년 2월 : 서울대학교 건축학과(공학사)
- 1991년 2월 : 서울대학교 건축학과(공학석사)
- 1996년 2월 : 서울대학교 건축학과(공학박사)
- 1998년 3월 ~ 현재 : 창원대학교 건축공학과 교수

<관심분야>

건축구조, 내진설계